

Formování finální architektury velkých planet

a doba s ním související

David Vokrouhlický (AÚ UK, Praha)

Obsah přednášky: a) standardní model formování Sluneční soustavy (rychlöpřehled)

- parametry protoplanetárního disku
- formování planetesimál
- překotný a oligarchický růst planetárních embryí
- post-oligarchický růst terestrických planet
- vznik velkých planet a migrace typu I a II
(počáteční konfigurace velkých planet)

b) období dotvoření finální konfigurace velkých planet

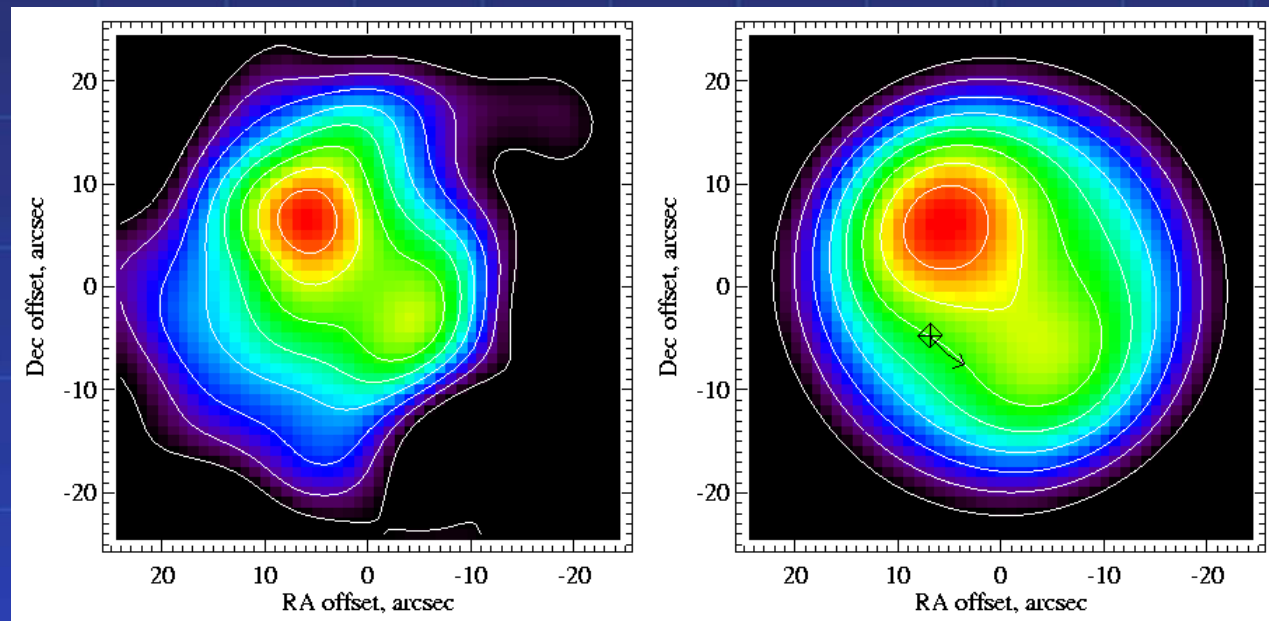
a jeho vliv na strukturu populací malých těles

Standartní model formování Sluneční soustavy (přehled)

1. Protoplanetární disk („aréna v níž se planety formovaly“)

(plynné a prachové disky pozorovány u řady hvězd v lokálním galaktickém okolí metodami optické, infračervené a sub-mm astronomie; plynné pro velmi mladé hvězdy [< 10 My], prachové pro starší hvězdy [> 10 My] jeví při geometrickém rozlišení struktury – asymetrie, mezery etp. – svědčící o vnořených planetách)

Př. Prachový disk kolem Vega, odpovídá zhruba pohledu na naši Sluneční soustavu s planetou ve ~ 50 AU a věkem ~ 350 My.



Standartní model formování Sluneční soustavy (přehled)

1. Protoplanetární disk („aréna v níž se planety formovaly“), pokr.

(plynné a prachové disky pozorovány u řady hvězd v lokálním galaktickém okolí metodami optické, infračervené a sub-mm astronomie; plynné pro velmi mladé hvězdy [< 10 My], prachové pro starší hvězdy [> 10 My] jeví při geometrickém rozlišení struktury – asymetrie, mezery etp. – svědčící o vnořených planetách)

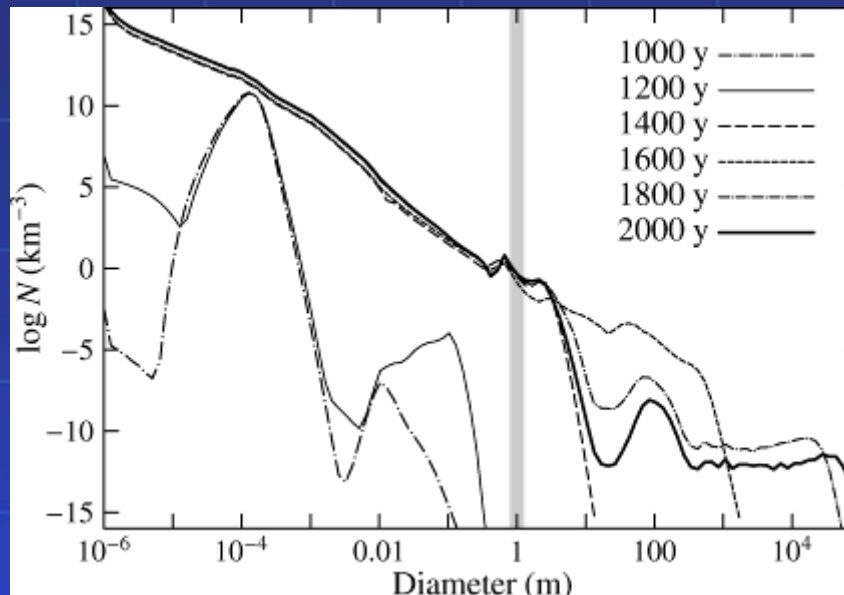
- hmota $\sim 0.005 - 0.1 M_{\odot}$, v případě Sluneční soustavy definujeme pojem $MMSN \sim 0.01 M_{\odot}$
- $\sim 99\%$ plynu vs $\sim 1\%$ prachu, chemická abundance předpokládaná jako u Slunce
- disipace energie lokálními procesy spojené se zářením, vede na akreci na centrální hvězdu [$\sim 10^{-8} - 10^{-6} M_{\odot}/yr$, menší v pozdějších fázích vývoje]
- malý stupeň ionizace ve vnitřní oblasti (fotoionizace a termální ionizace) a vnější oblasti (UV záření objektů hvězdného okolí a kosmickým zářením) má za následek složitou vazbu na magnetické pole hvězdy a okolí a implikuje, že disk je v těchto oblastech turbulentní na mnoha škálách; ve vnitřních oblastech disku se předpokládá méně turbulentní proudění, tzv. *mrtvá zóna*
- termodynamické veličiny (hustota, teplota) radiálně klesají; ve vnitřní části disku kondensují těžší elementy (kovy, silikáty, sulfidy atp.); *čára sněhu* kde za lokálních termodynamických podmínek kondenzuje voda, předpokládá se 4-6 AU \rightarrow 1-2 AU, jak disk chladne

Standartní model formování Sluneční soustavy (přehled)

2. Formování planetesimál

Růst $\sim \mu\text{m}$ částic do těles velikosti $\sim (1-100)$ km, *planetesimál*, na krátké časové škále $\sim 10-100$ ky (@ 1/5 AU); pro strukturu planetesimál hraje dominantní roli jejich vlastní gravitace.

- klasický scénář: vertikální usazení k rovině symetrie disku a následná lokální fragmentace do planetesimál

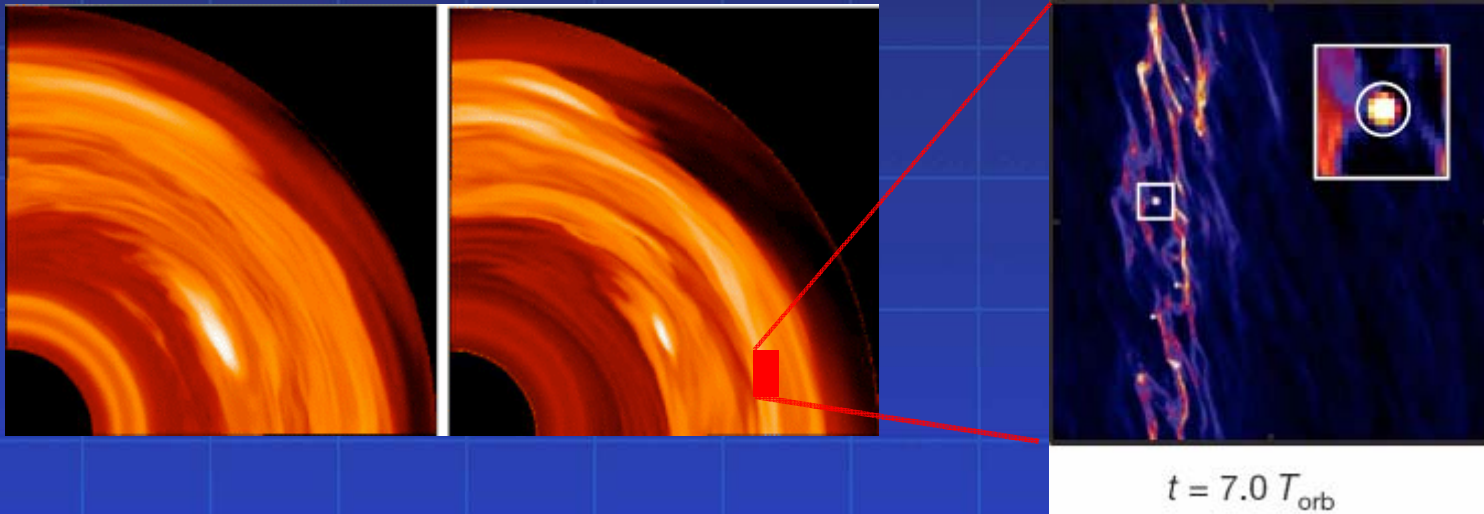


Standartní model formování Sluneční soustavy (přehled)

2. Formování planetesimál, pokr.

Růst $\sim \mu\text{m}$ částic do těles velikosti $\sim (10-100)$ km, *planetesimál*, na krátké časové škále $\sim 10-100$ ky (@ 1/5 AU); pro strukturu planetesimál hraje dominantní roli jejich vlastní gravitace.

- nové směry: efekty turbulence zabraňují přímé gravitační fragmentaci tenkého prachového disku, vytvářejí ale nové možnosti koncentrace $\sim \text{mm-cm}$ částic v oblastech maxima tlaku turbulentního proudění



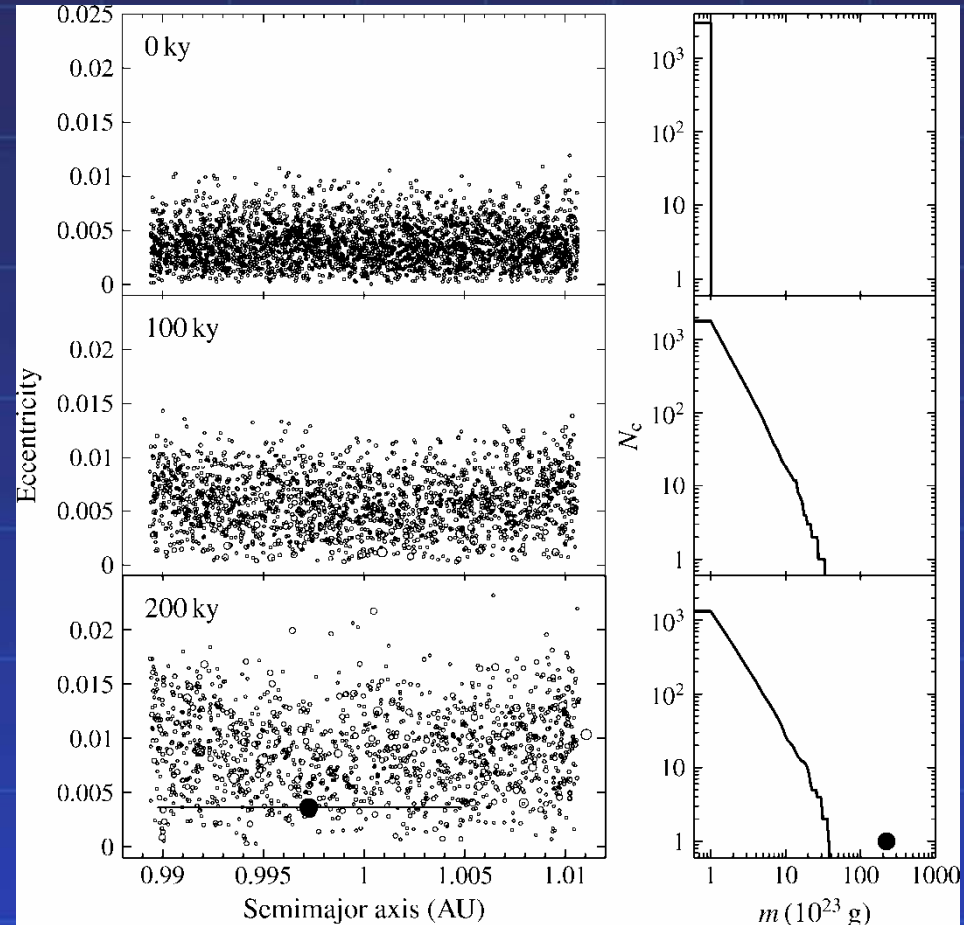
Standartní model formování Sluneční soustavy (přehled)

3. Překotný a oligarchický růst planetárních embryí

Další růst je ovlivňován gravitačním působením individuálních planetesimál při vzájemném průletu a odporu plynného prostředí.

■ Předpokládá se, že druhý z těchto faktorů tlumí relativní rychlosti po určitou dobu, která umožní *překotný růst* náhodně velké planetesimály v určité heliocentrické oblasti.

Takto vzniklí „oligarchové“ mají hmotu $\sim 10^{24}$ - 10^{25} g (sub-lunární/lunární @1/5 AU) a dominují oblasti ~ 0.005 - 0.05 AU (@1/5 AU)



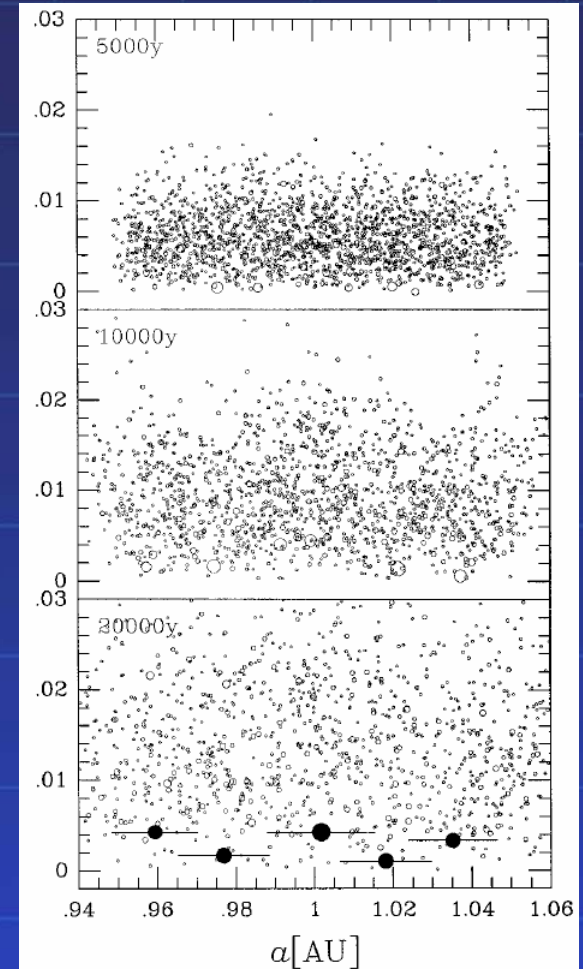
Standardní model formování Sluneční soustavy (přehled)

3. Překotný a oligarchický růst planetárních embryí, pokr.

Další růst je ovlivňován gravitačním působením individuálních planetesimál při vzájemném průletu a odporu plynného prostředí.

■ V okamžiku vzniku oligarchů v určité oblasti odpor plynného prostředí nemůže více tlumit relativní rychlosti potkávání těles, které jsou určeny únikovou rychlostí z povrchu oligarchů. Růst se výrazně zpomalí.

Výsledkem je vznik planetárních embryí s hmotu $\sim 5 \times 10^{25}$ g (lunární/marsovu @1/5 AU) a dominují oblasti $\sim 0.01-0.1$ AU (@1/5 AU)



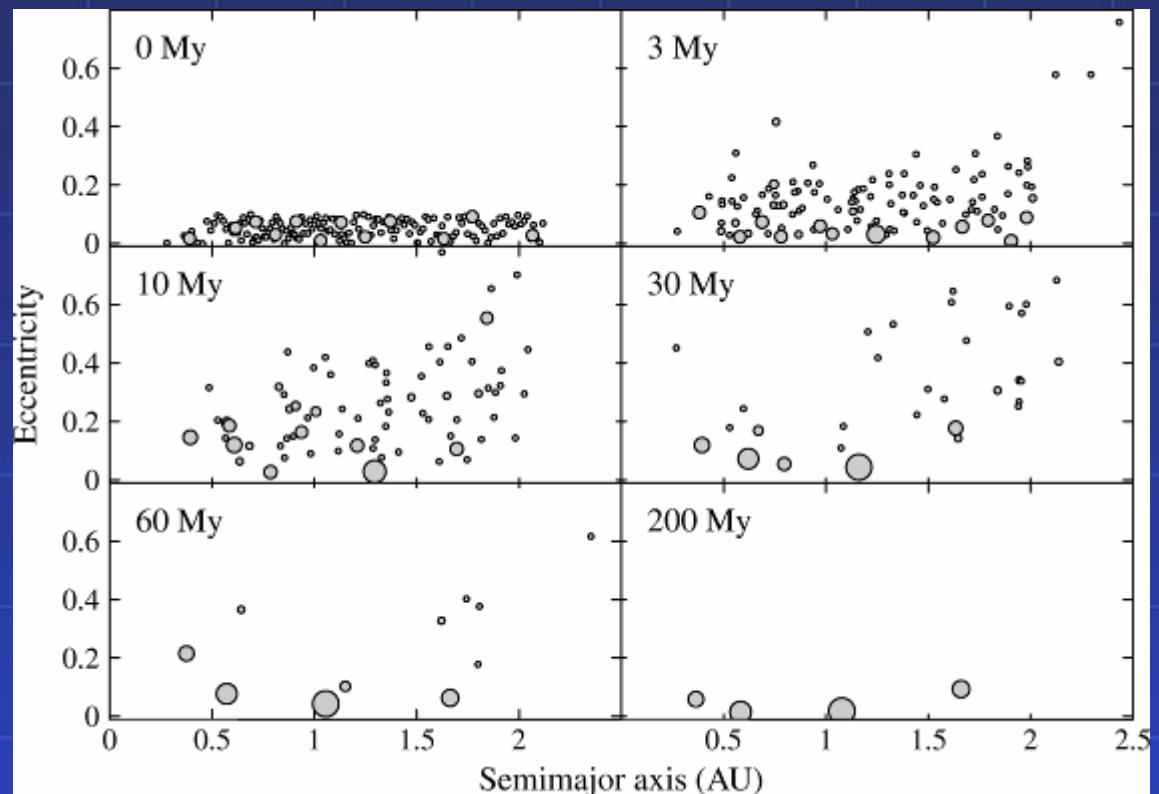
Standartní model formování Sluneční soustavy (přehled)

4. Post-oligarchický růst terestrických planet

V zóně terestrických planet vznikne ~ 20-40 embryí, které dále rostou vzájemnými srážkami do 2-5 planet na časové škále ~100-300 My.

Horká témata současného studia:

- role migrace (typu I) v residuálním plynním disku
- role gravitačního působení velkých planet

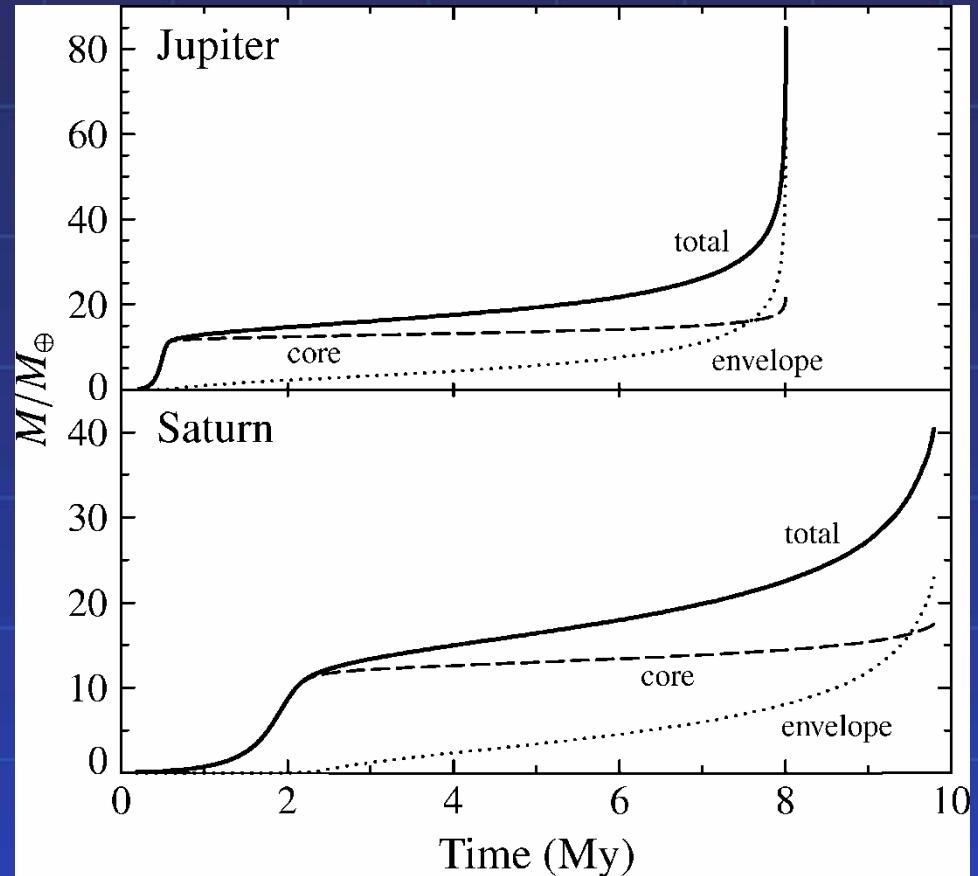


Standardní model formování Sluneční soustavy (přehled)

5. Vznik velkých planet a migrace typu I a II

V podmínkách vnější části disku (nižší teplota a hmotnější embya) se začínají formovat plynné obálky. Tento proces je zprvu pomalý, ale velmi se zrychlí po dosažení *kritické hmoty* ($\sim 10\text{-}12 M_{\oplus}$), kdy již gradient tlaku plynu v atmosféře nemůže kompenzovat gravitační vliv planety.

Délka prodlevy stagnující fáze silně závisí na předpokladech o opacitě atmosféry.



Standartní model formování Sluneční soustavy (přehled)

5. Vznik velkých planet a migrace typu I a II, pokr.

Embrya vnořená do plynného disku nezanedbatelné hmoty s ním gravitačně interagují; výsledkem je *migrace* planety. Je-li hmota embrya malá ($\sim 5-10 M_{\oplus}$), porucha v rozložení hustoty disku je též malá – *migrace typu I*. Obvykle velmi rychlá.

Možnosti řešení překotné migrace typu I:

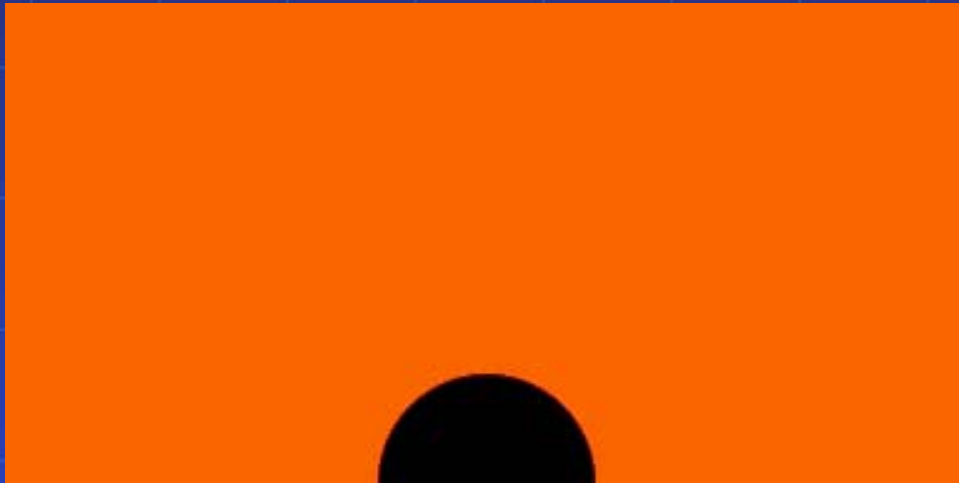
- a) migrace podporuje růst embrya,
- b) turbulence zpomaluje migraci,
- c) variace hustoty disku (např. na rozhraní mrtvé zóny či čáry sněhu) zastavuje migraci



Standartní model formování Sluneční soustavy (přehled)

5. Vznik velkých planet a migrace typu I a II, pokr.

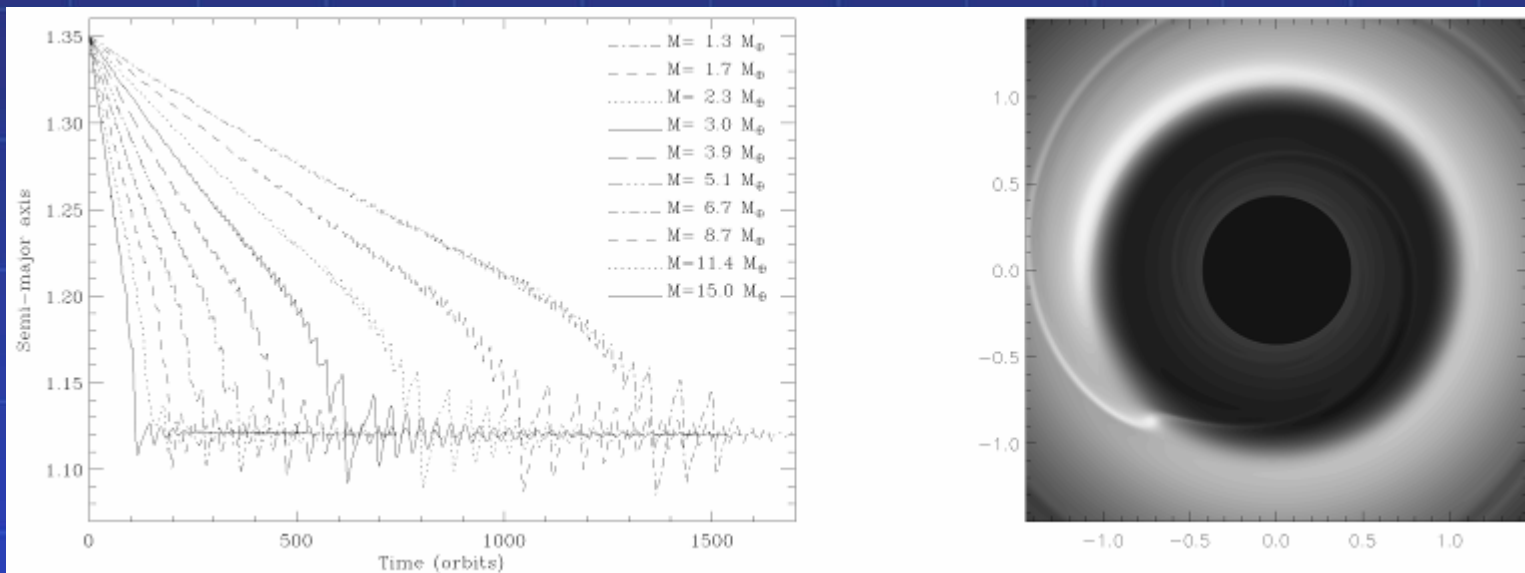
Je-li hmota embrya velká ($> 20 M_{\oplus}$), porucha v rozložení hustoty disku je též velká, charakteristická eliminací plynu z korotační oblasti – *migrace typu II*. Obvykle pomalejší.



Standardní model formování Sluneční soustavy (přehled)

5. Vznik velkých planet a migrace typu I a II, pokr.

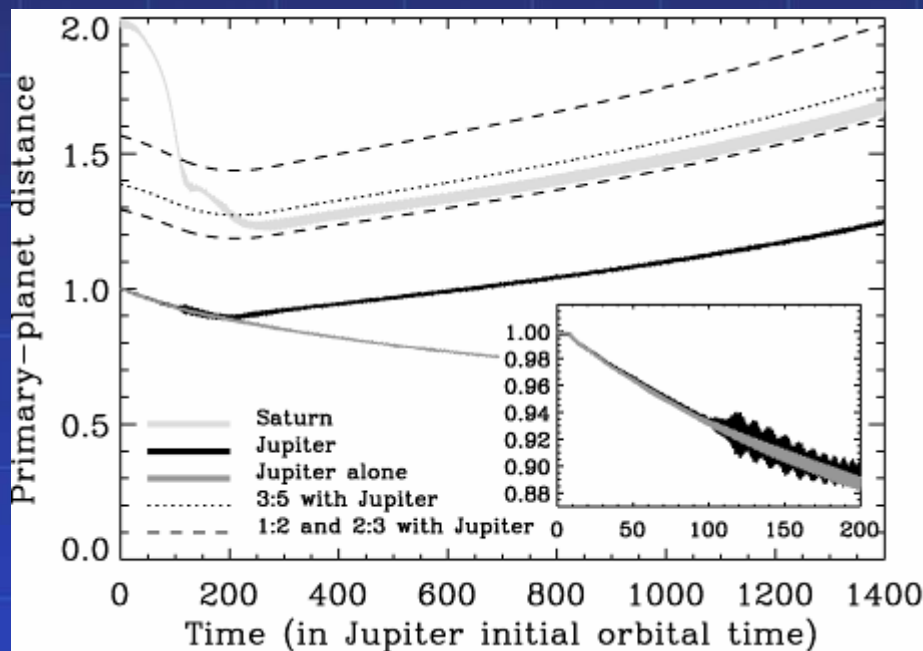
Oba typy migrace v plynném prostředí reprezentují potenciálně problém pro vysvětlení existence planet. Nejslibnější cestou k vysvětlení zastavení této migrace je hustotní variace v disku (např. na rozhraní *mrtvé zóny* či *čáry sněhu*).



Standardní model formování Sluneční soustavy (přehled)

5. Vznik velkých planet a migrace typu I a II, pokr.

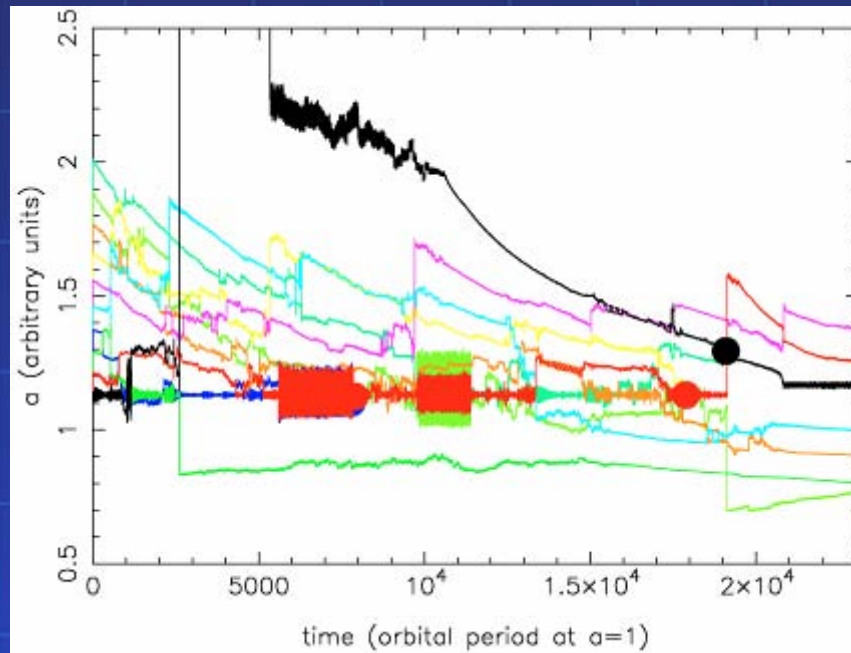
V případě, že migraci podléhají dvě (či více) hmotná embrya, mohou se zachytit do vzájemné *resonance středního pohybu*. Výběr resonance závisí na parametrech rozložení hustoty disku, nejrobustnější je resonance 2:3.



Standardní model formování Sluneční soustavy (přehled)

5. Vznik velkých planet a migrace typu I a II, pokr.

V kombinaci s utlumením migrace v oblasti hustotního maxima disku, očekáváme zformování Jupiteru v oblasti čáry sněhu a postupné zachycení vnějších planet v *kompaktní a rezonanční konfiguraci*.



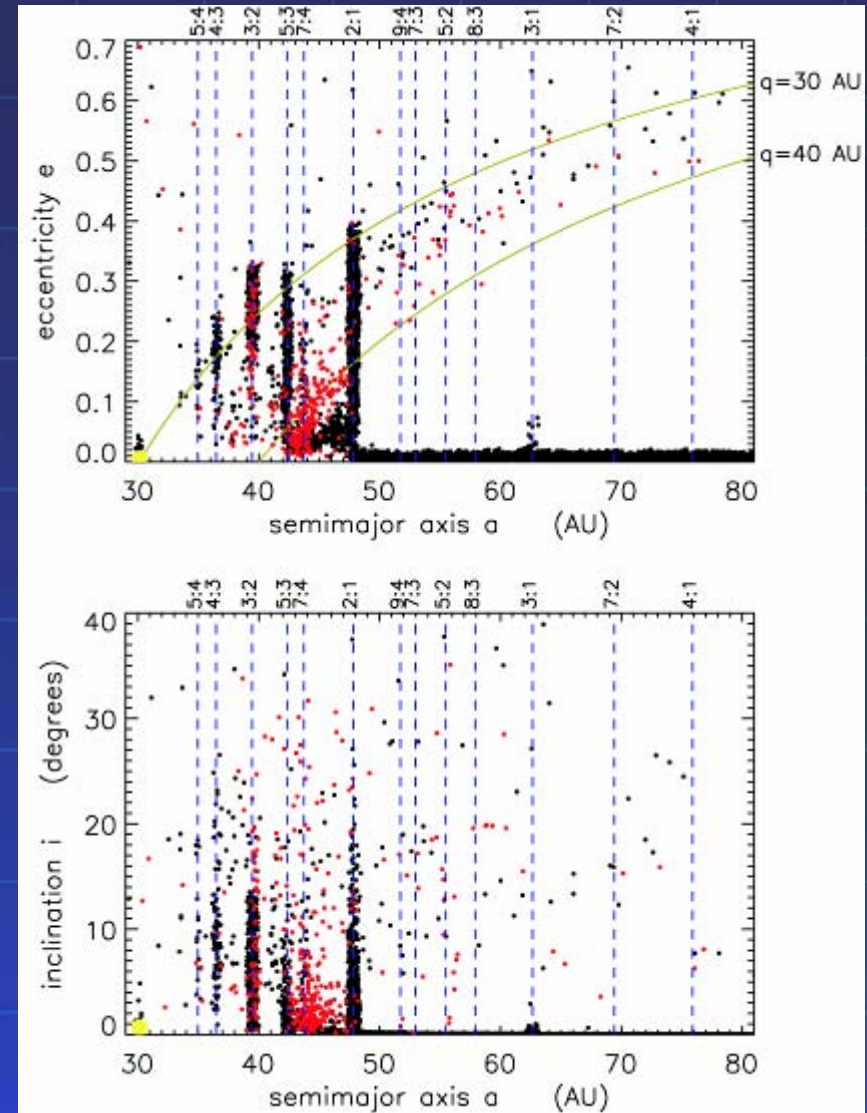
Období formování finální architektury velkých planet

– Prelude –

- od 80. let známo, že planety vnořené v disk planetesimál o celkové hmotnosti srovnatelné s planetami, ale zanedbatelné individuální hmotnosti, (i) eliminují disk, a (ii) prodělávají migraci.
- v 90. letech kvantitativně spojeno s vysvětlením zachycení Pluta v oblasti vnější resonance 3/2 s Neptunem se současným zvětšováním excentricity (a sklonu) jeho dráhy. Adiabatický model dokonce předpovídá míru migrace Neptunu (~ 8 AU) a celkovou hmotnost disku ($\sim 30 M_{\oplus}$)...

Období formování finální architektury velkých planet

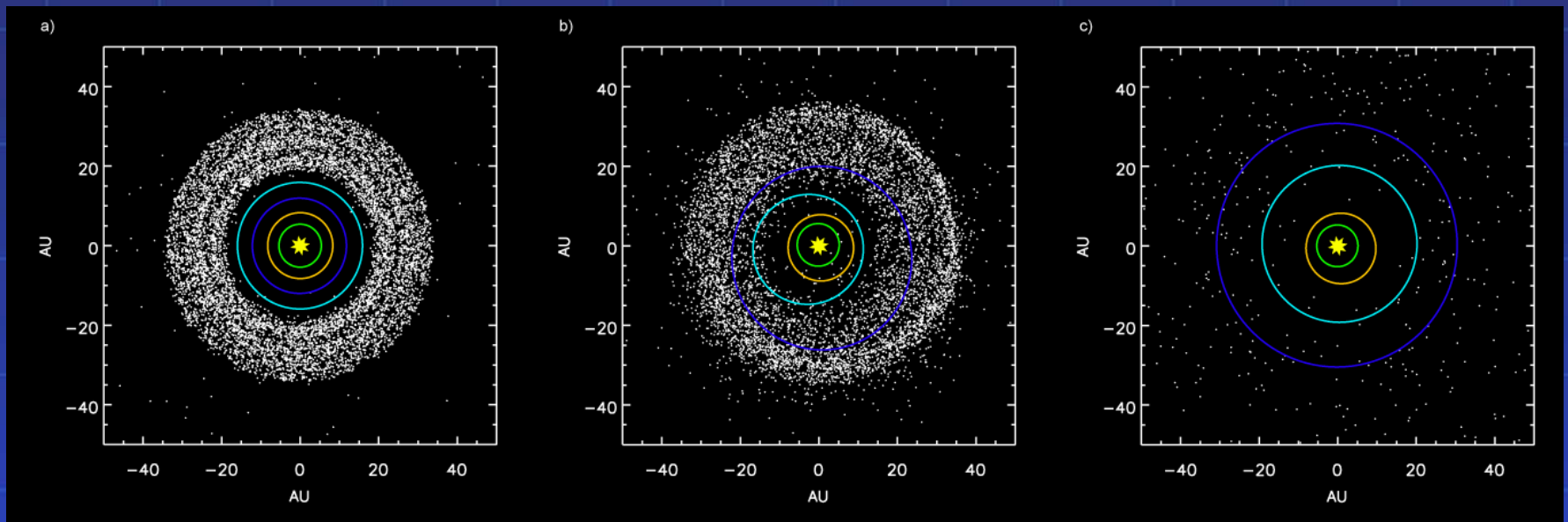
Původní představa vede k uspokojivému vysvětlení dráhy Pluta a plutin, nereprodukuje však správně celkovou strukturu drah těles trans-Neptunické oblasti a není schopen vysvětlit fakt, že trans-Neptunická oblast obsahuje kumulativně asi jen setinu předpokládané hmoty.



Období formování finální architektury velkých planet

– Moderní verze (Nice model) –

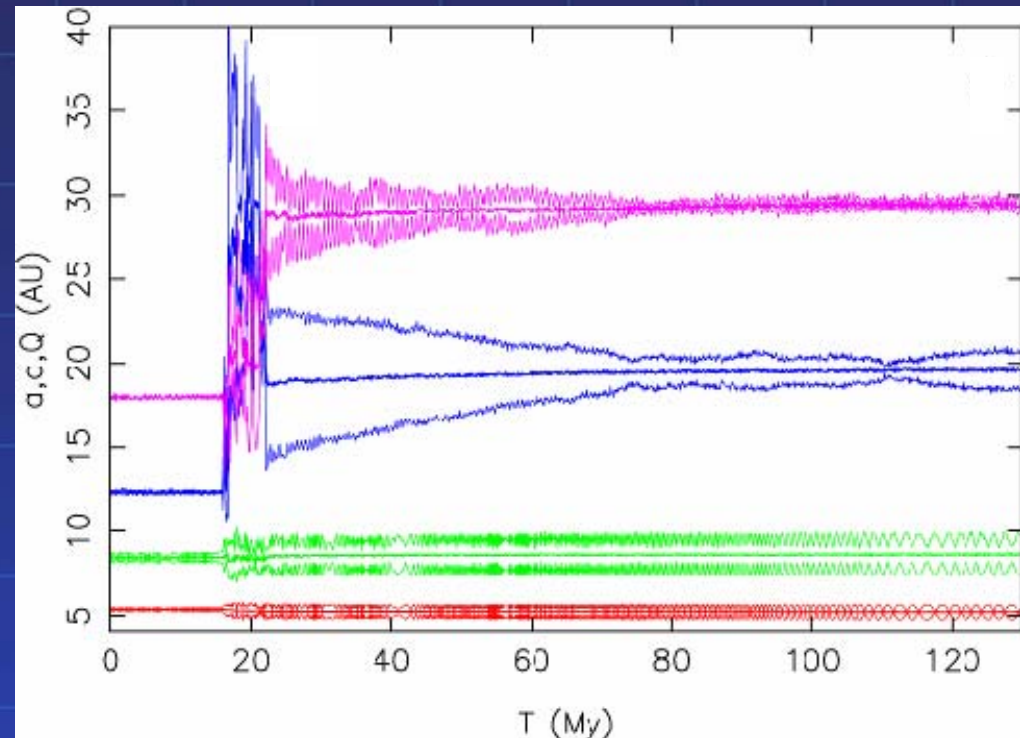
... vychází z těchto poznatků, ale přináší řadu detailů a jednu revoluční myšlenku: **konfigurace velkých planet prodělala globální (strukturální) změnu.**



Období formování finální architektury velkých planet

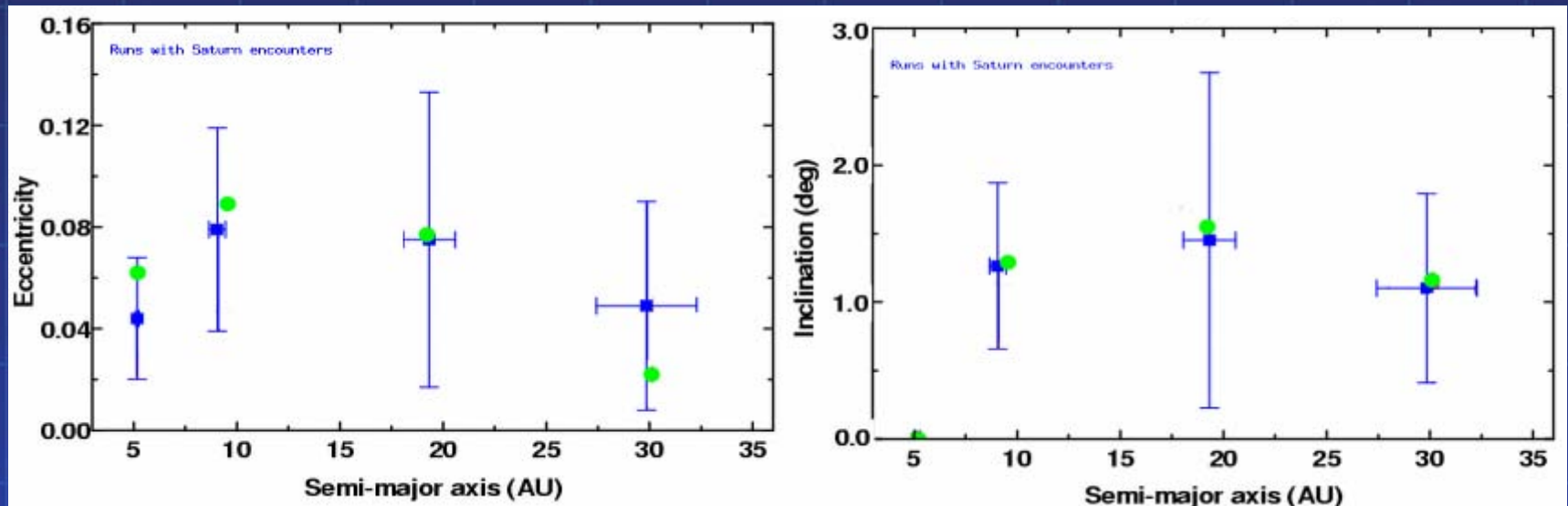
1. Dobrá shoda teoreticky předpovězených drah se skutečností

- nenulové excentricity drah Jupiteru a Saturnu
- vyšší excentricita dráhy Uranu
- potenciální možnost výměny Uranu a Neptunu



Období formování finální architektury velkých planet

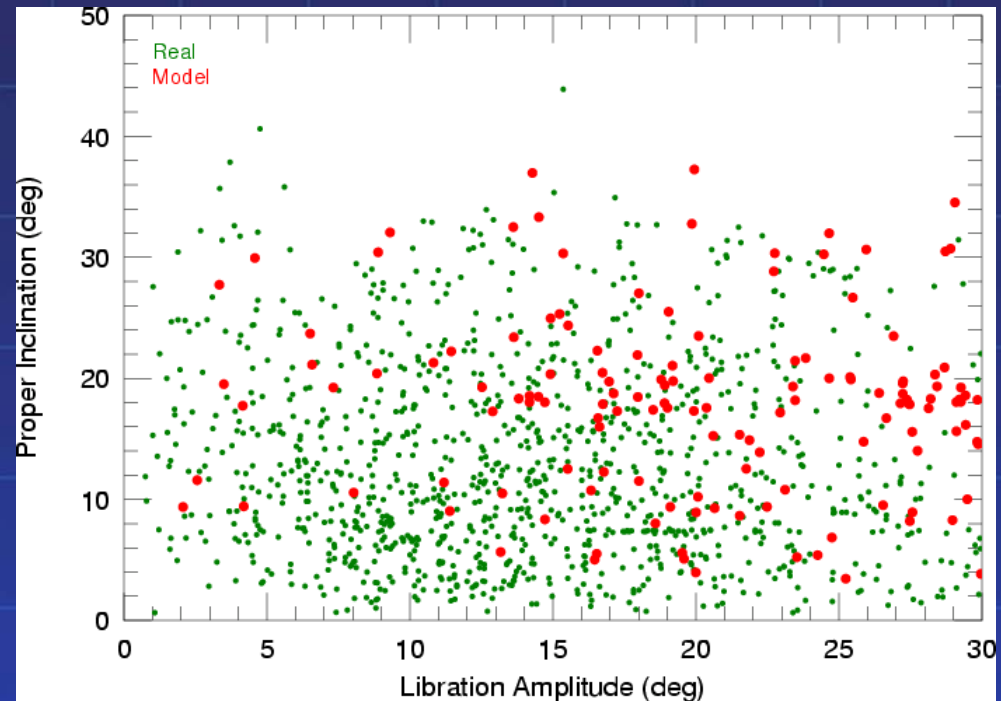
1. Dobrá shoda teoreticky předpovězených drah se skutečností



Období formování finální architektury velkých planet

2. Uspokojivě vysvětleny orbitální vlastnosti Jupiterových Trojanů

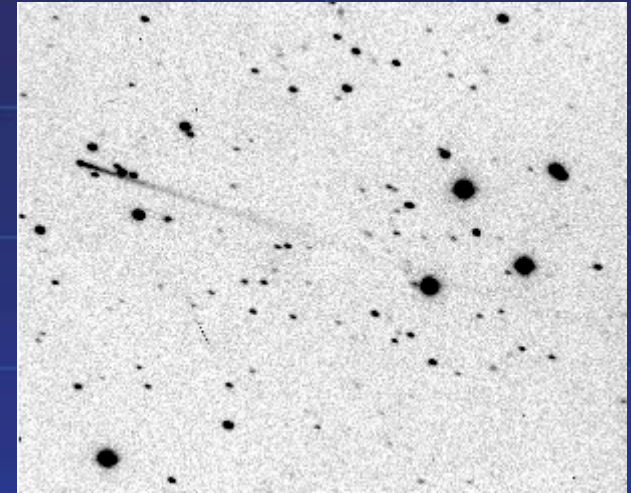
- dráhy Trojanů Jupiteru mají překvapivě vysoké hodnoty sklonu k ekliptice (podobné kratko-periodickým kometám a trans-neptunickým tělesům)



Období formování finální architektury velkých planet

3. Existence primitivních, resp. aktivních asteroidů

- aktuálně známe 5 těles na plně asteroidálních drahách, které jeví kometární aktivitu
- vnější část pásu planetek obsahuje tělesa spektrálně nerozlišitelné od Trojanů (a komet)

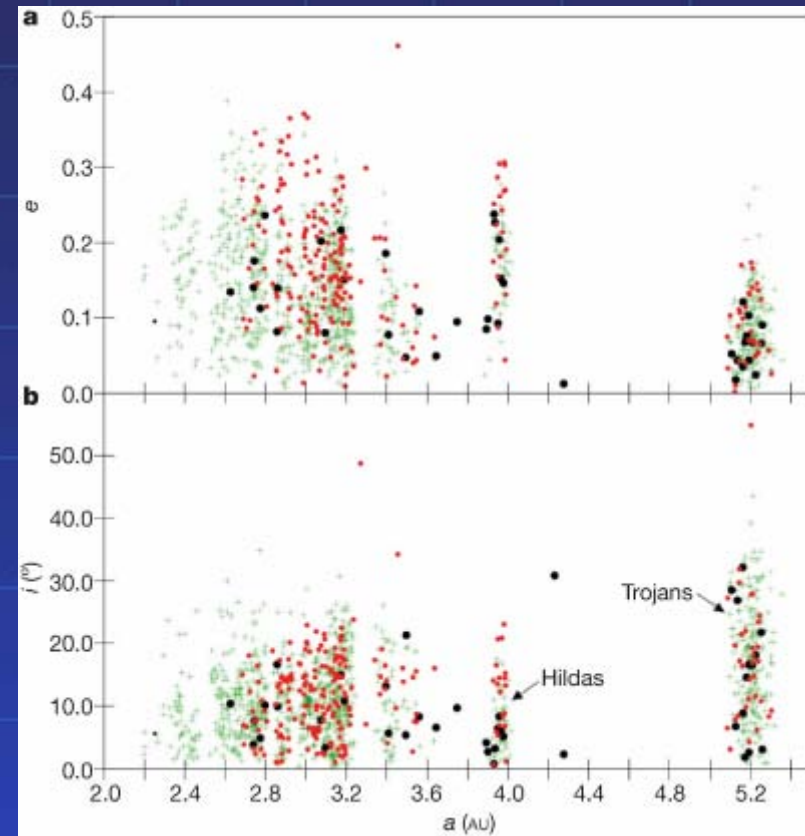


7968 Elst-Pizarro = 133P/Elst-Pizarro

Období formování finální architektury velkých planet

3. Existence primitivních, resp. aktivních asteroidů, pokr.

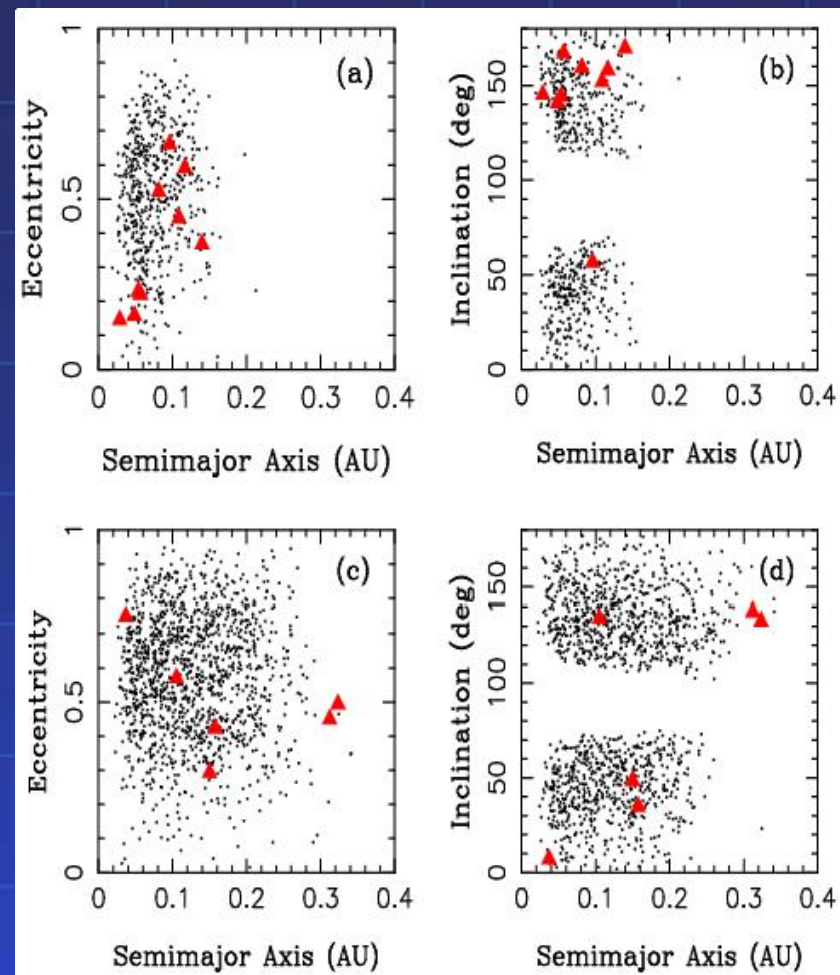
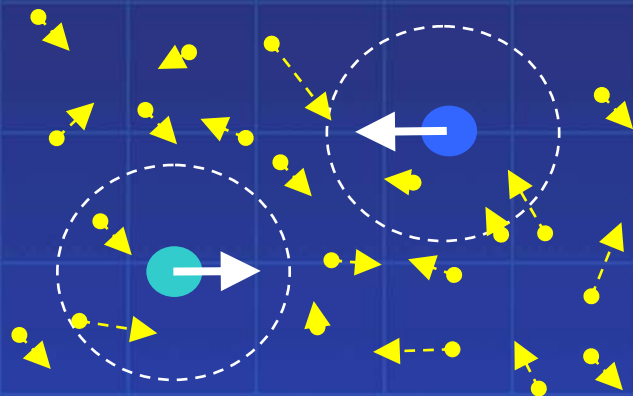
- aktuálně známe 5 těles na plně asteroidálních drahách, které jeví kometární aktivitu
- vnější část pásu planetek obsahuje tělesa spektrálně nerozlišitelná od Trojanů (a komet)



Období formování finální architektury velkých planet

4. Uspokojivé vysvětlení drah iregulárních satelitů (především Uranu a Neptunu)

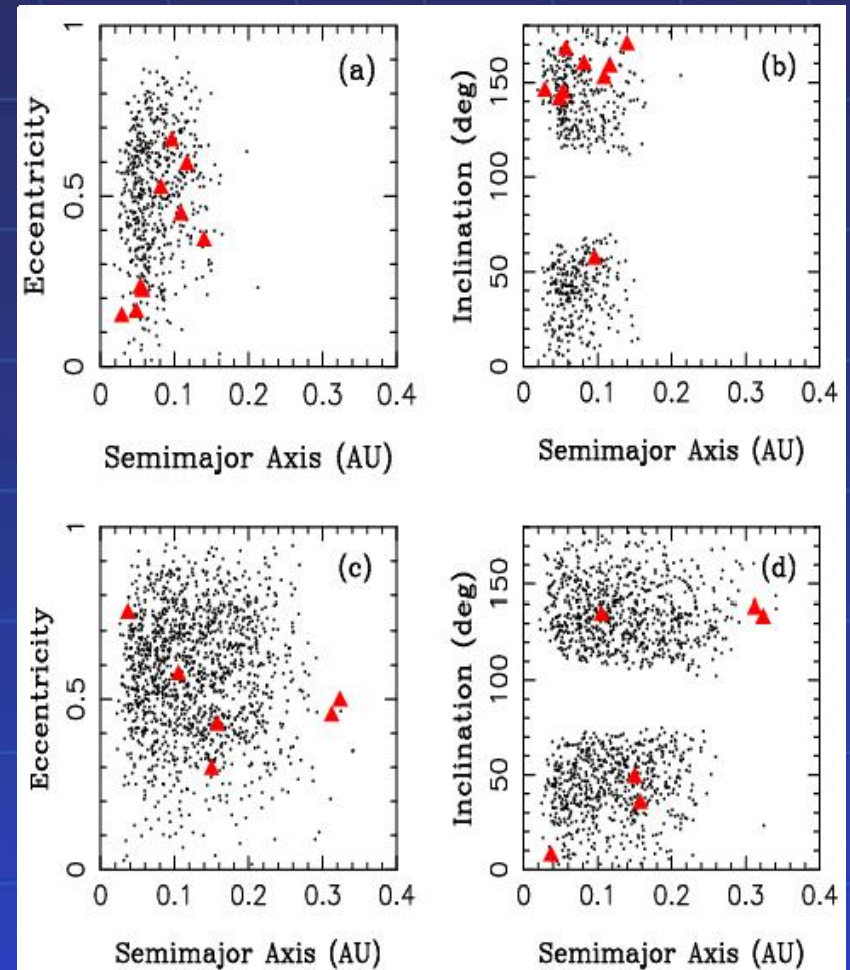
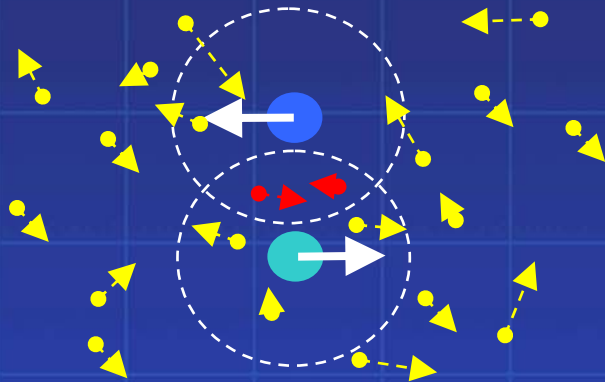
- vzdálené (iregulární) satelity byly zachyceny v okamžiku přiblížení planet na méně než ~ 1 AU; blízké planetesimály mohly být v této fázi trvale zachyceny



Období formování finální architektury velkých planet

4. Uspokojivé vysvětlení drah iregulárních satelitů (především Uranu a Neptunu)

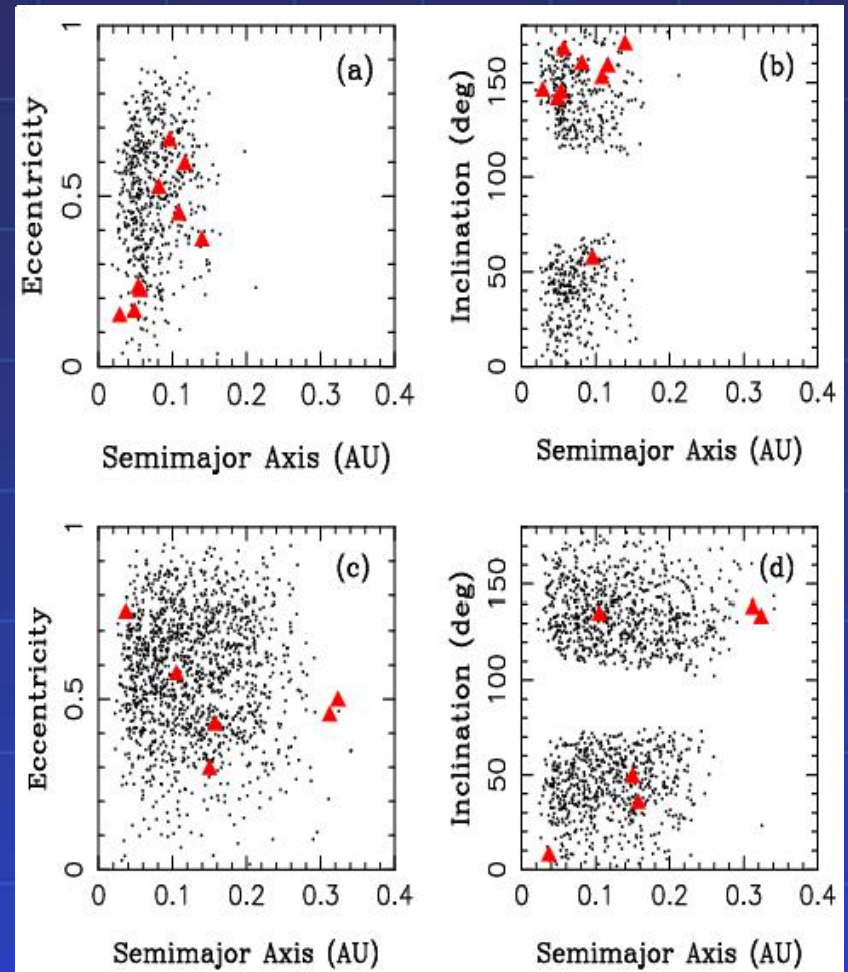
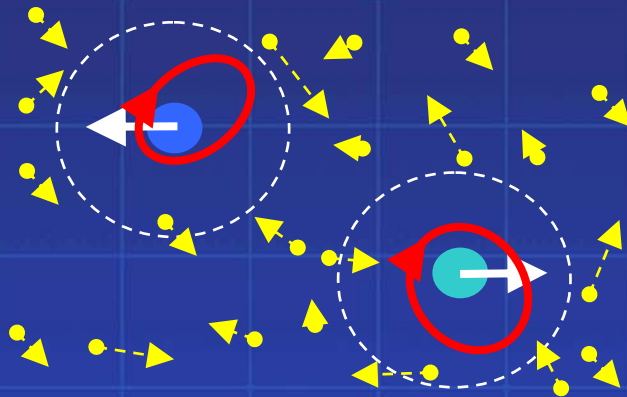
- vzdálené (iregulární) satelity byly zachyceny v okamžiku přiblížení planet na méně než ~ 1 AU; blízké planetesimály mohly být v této fázi trvale zachyceny



Období formování finální architektury velkých planet

4. Uspokojivé vysvětlení drah iregulárních satelitů (především Uranu a Neptunu)

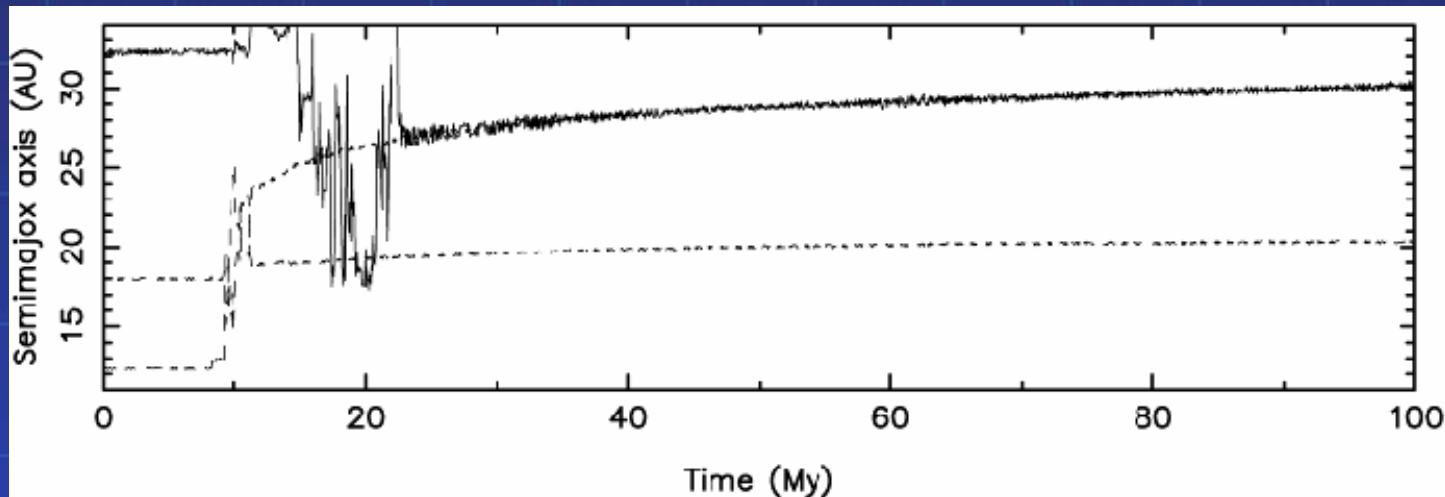
- vzdálené (iregulární) satelity byly zachyceny v okamžiku přiblížení planet na méně než ~ 1 AU; blízké planetesimály mohly být v této fázi trvale zachyceny



Období formování finální architektury velkých planet

5. Existence Trojanů (souputníků) Neptunu

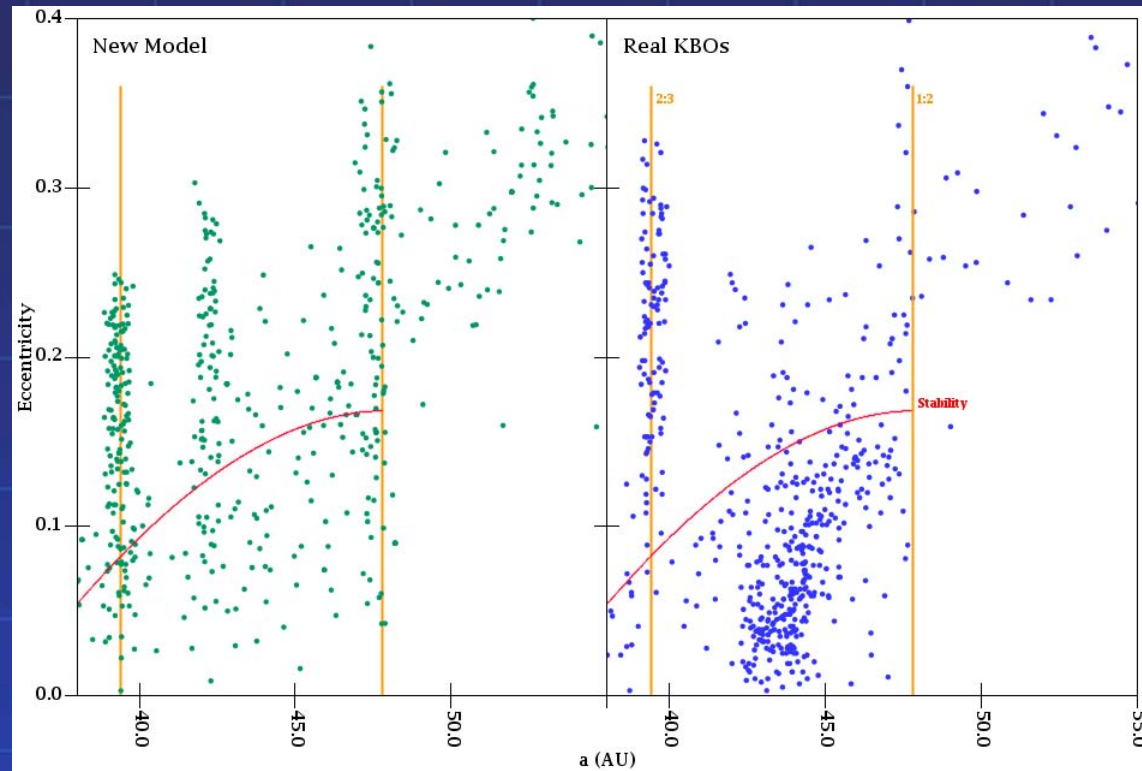
- aktuálně známe 6 Trojanů, kteří doprovázejí Neptun; 2 z těchto drah mají velmi vysoký sklon (~25 stupňů) k dráze této planety, což naznačuje podobný mechanismus záchytu, jako u Jupiterových Trojanů



Období formování finální architektury velkých planet

6. Rozložení drah trans-Neptunických těles

- uspokojivá shoda v rozložení drah trans-neptunických těles, především vysvětlení existence horké komponenty s vysokými hodnotami sklonu k ekliptice
- vysvětlení ostrého ukončení Kuiperova pásu za $\frac{1}{2}$ resonancí středního pohybu s Neptunem
- vysvětlení hmotového deficitu trans-neptunické oblasti oproti extrapolaci rozložení hmoty v primordiální mlhovině

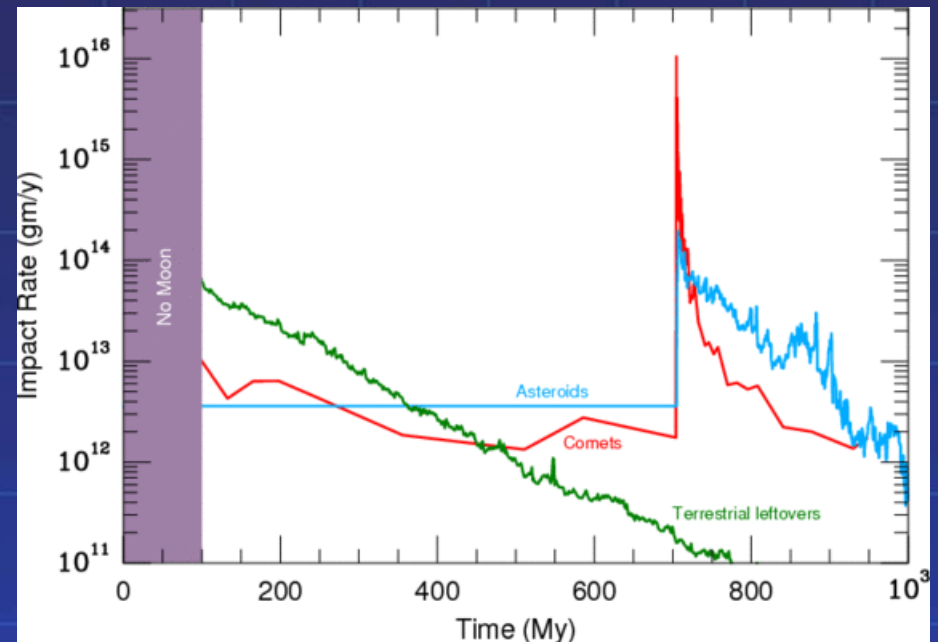


Období formování finální architektury velkých planet

7. Vysvětlení pozdního bombardování terestrických těles

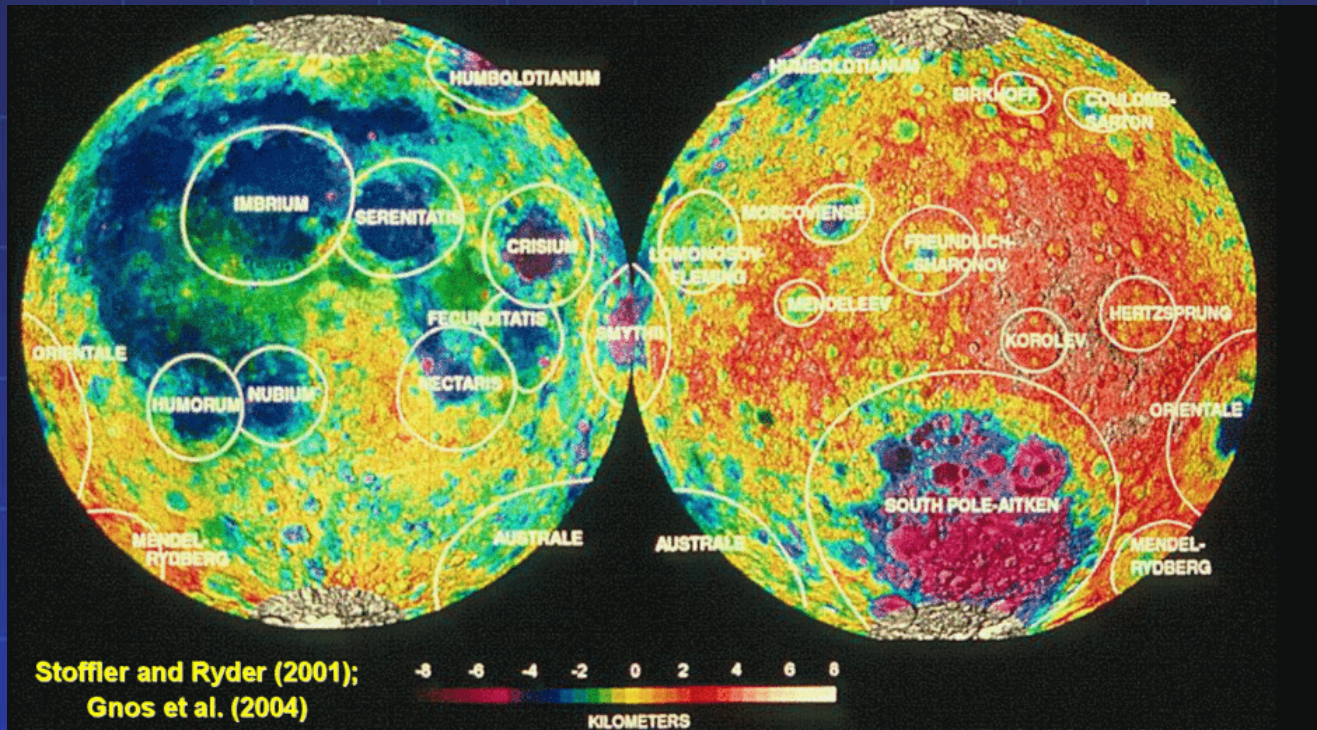
- v okamžiku destabilizace planetesimálního disku vně velkých planet došlo k masivnímu bombardování terestrických planet/Měsíce; během krátkého období dopadlo na Měsíc asi $(5-10) \times 10^{21}$ g kosmického materiálu, včetně projektilů velikosti až 100 km v průměru

- ostatní tělesa, prodělala podobný vývoj, ale u Země a Marsu informace zatím nedostatečná



Období formování finální architektury velkých planet

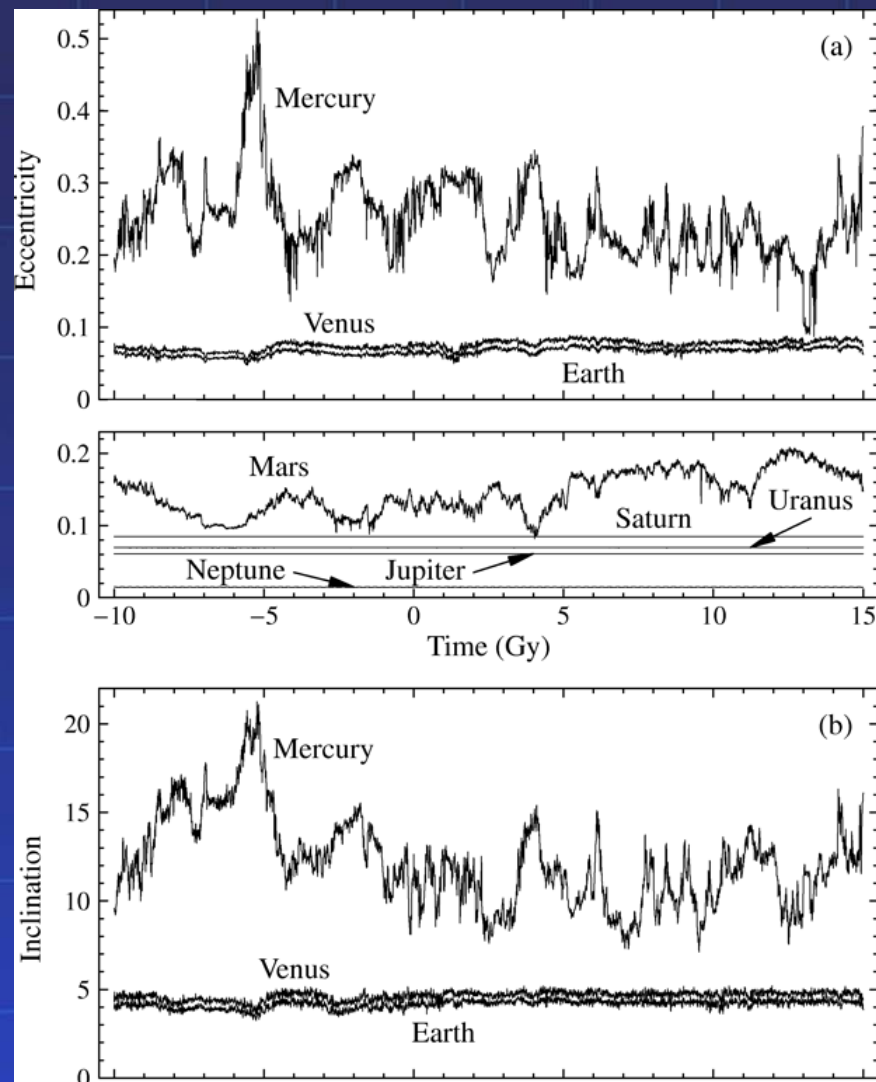
7. Vysvětlení pozdního bombardování terestrických těles (pokr.)



Asi 40 mare na Měsíci s průměrem > 300 km; všechna starší než 3.8 mld let, ale přesné datování jen pro některé (Imbrium 3.85, Orientale 3.82 mld let).

... a od té doby, žili všichni šťastně a spokojeně.

Výsledný planetární systém je orbitálně stabilní na časové škále miliard let.



(výsledky dosud nejdelší provedené numerické integrace pohybu planet, J. Laskar)

Období formování finální architektury velkých planet

Stabilita současné Sluneční soustavy („skoro jasno“)

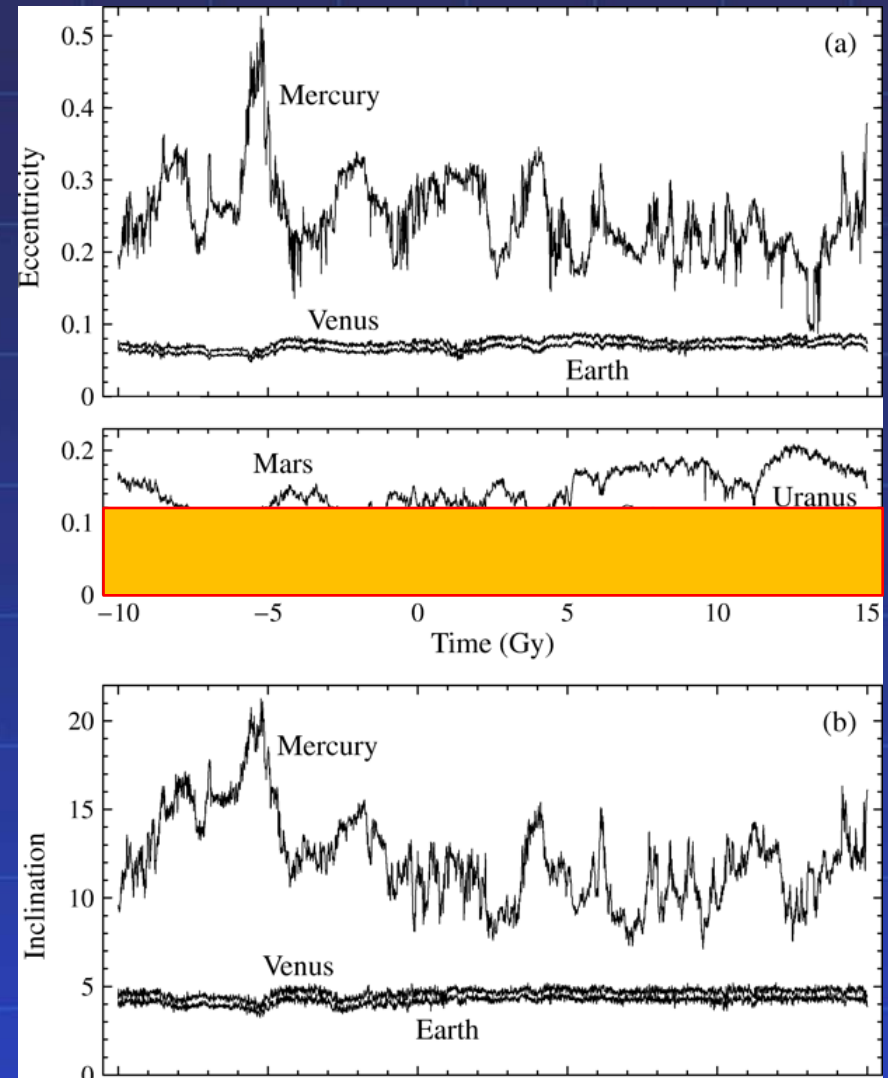
Vedle problému pohybu Měsíce druhý
velký nevyřešený okruh v díle

I. Newtona...

... následně inspiroval celoživotní dílo

Lagrange i Laplace, i mnohých
dalších.

(výsledky dosud nejdelší provedené numerické
integrace pohybu planet, J. Laskar)



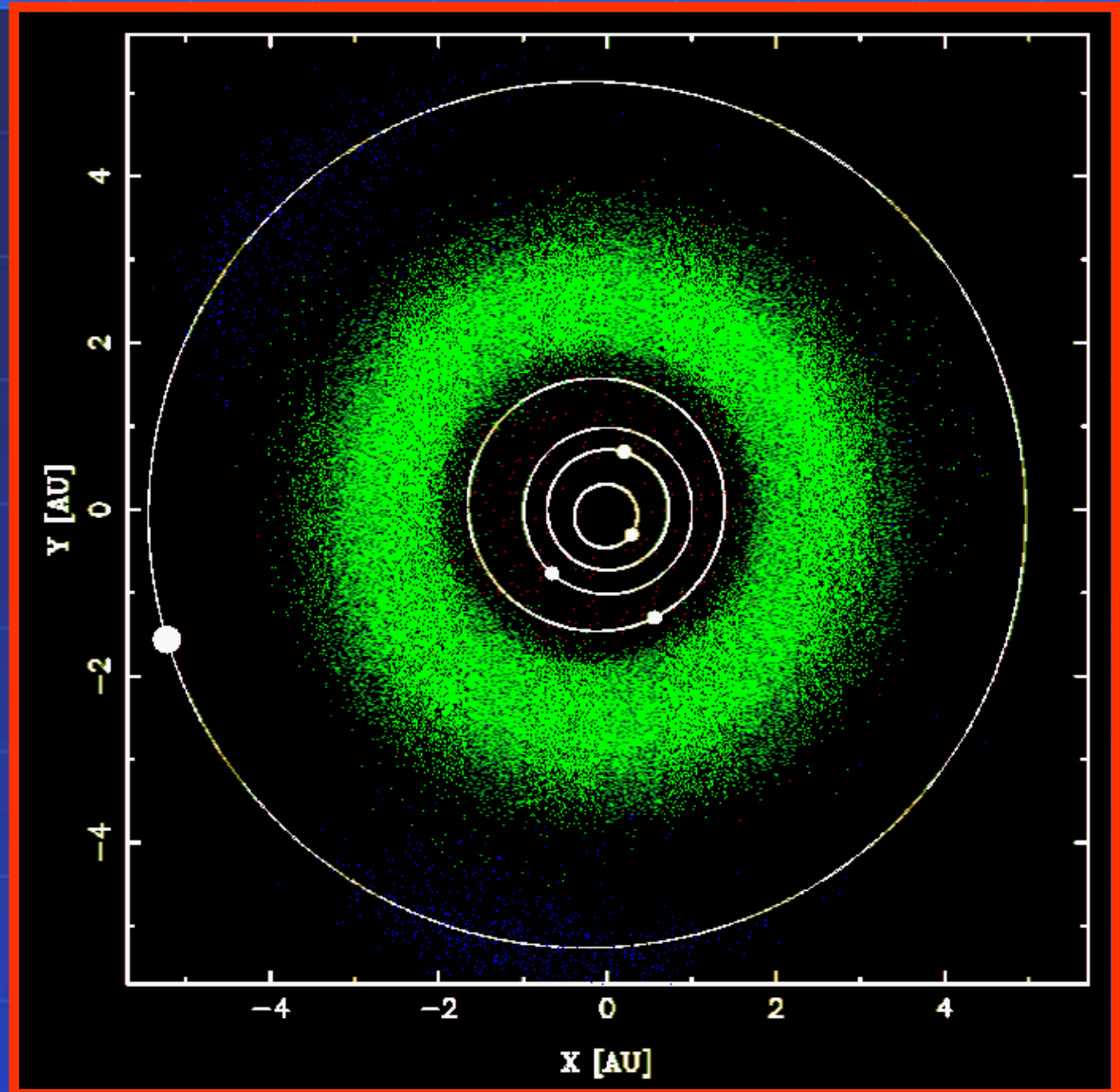
Stabilita současné Sluneční soustavy (pokr.)

(„skoro jasno“)

Oblast terestrických

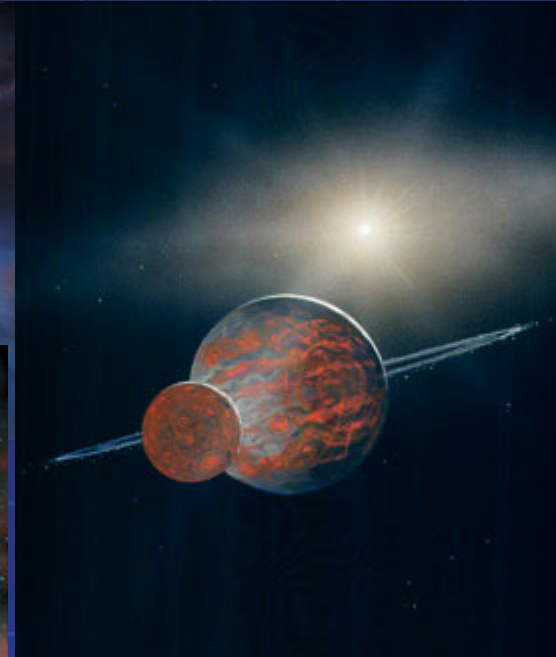
planet a pás planetek:

- $\sim 10^6$ těles s průměrem $D > 1$ km mezi Marsem a Jupiterem
- $\sim 10^6$ těles s průměrem $D > 1$ km v oblasti Jupiterových Trojanů
- $\sim 10^3$ těles s průměrem $D > 1$ km mezi blízkozemními planetkami
- ...



Raná Sluneční soustava („zataženo“)

Překotné období chaotického formování planet, satelitů a populací malých těles

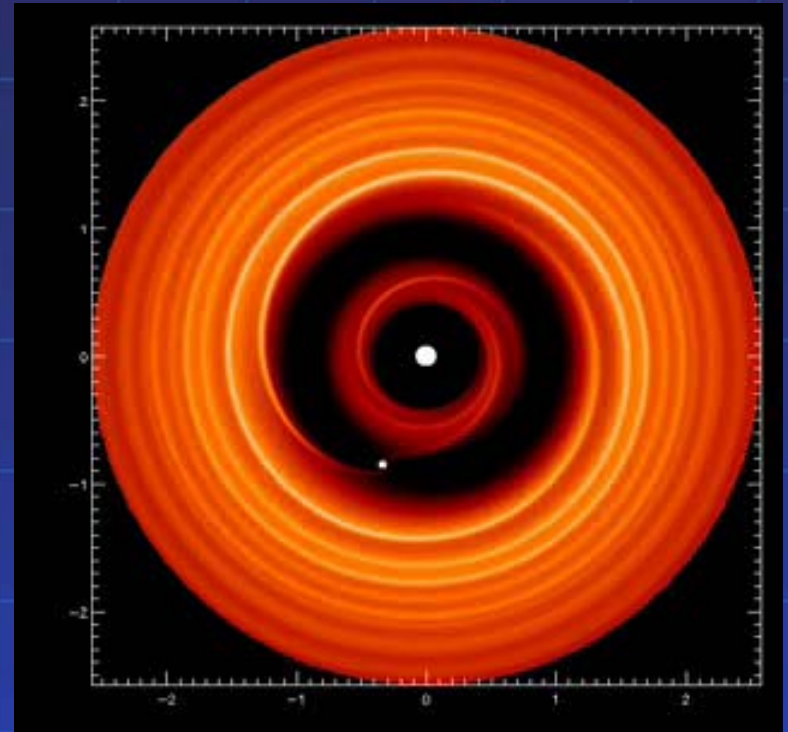


obrázky:

Bill Hartmann, PSI

Standardní model formování Sluneční soustavy (přehled)

5. Vznik velkých planet a migrace typu I a II, pokr.



Standartní model formování Sluneční soustavy (přehled)

5. Vznik velkých planet a migrace typu I a II, pokr.

